



УДК 621.039

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ
ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ НА ГРАНИЦЕ
СТЕНКА-ЖИДКОСТЬ В МОДЕЛИ
ДВУХСТЕННОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ С ЗАЗОРОМ ИЗ СПЛАВА ВУДА**

**INVESTIGATION OF THE HEAT TRANSFER
PROCESS INTENSITY ON THE WALL-LIQUID
BOUNDARY IN THE MODEL OF A DOUBLE-
WALLED HEAT TRANSFER SURFACE WITH
WOOD'S ALLOY FILLED GAP**

Астафьев Евгений Андреевич, студент каф. «Атомные станции и ВИЭ», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: pc456782@mail.ru, Тел.: +7(912)270-06-07

Горупай Евгений Николаевич, студент каф. «Атомные станции и ВИЭ», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: blacksnz@gmail.com, Тел.: +7(912)629-44-39

Климова Виктория Андреевна, ст. преподаватель каф. «Атомные станции и ВИЭ», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.a.klimova@mail.ru, Тел.: +7(953)000-84-00

Ташлыков Олег Леонидович, канд. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и ВИЭ», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: otashlykov@list.ru, Тел.: +7(343)375-97-37

Evgeny A. Astafyev, Student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: pc456782@mail.ru, Ph.: +7(912)270-06-07

Evgeny N. Gorupai, Student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: blacksnz@gmail.com, Ph.: +7(912)629-44-39

Viktoriiia A. Klimova, senior lecturer, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.klimova@mail.ru, Ph.: +7(953)000-84-00

Oleg L. Tashlykov, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: otashlykov@list.ru, Ph.: +7(343)375-97-37

Аннотация: Проведено исследование зависимости процессов теплообмена от параметров двухстенной теплообменной поверхности. Проанализированы полученные результаты, проведена оценка эффективности данной конструкции.

Abstract: The dependence of the heat exchange processes on the parameters of a two-wall heat exchange surface is studied. The obtained results were analyzed, the estimation of the design efficiency was made.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах; парогенератор; двойная стенка; сплав Вуда; натриевый теплоноситель; компьютерное моделирование.

Key words: a fast neutron reactor; steam generator; double wall; alloy of Wood; sodium heat carrier; computer modelling.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из принципиальных вопросов при разработке конструкций парогенератора (ПГ)

натрий-вода является выбор способа разделения теплоносителей, т.е. типа теплообменной поверхности. Активное химическое взаимодействие натрия и воды (пара) вызывает

необходимость исключения возможности их контакта, например, путем использования многостенных теплообменных труб. К настоящему времени реализованы различные конструкционные решения. Одним из них является использование теплообменных конструкций, в которых каждый из теплоносителей заключен в индивидуальную трубку (ПГ реактора DFR). Теплообмен между трубками осуществляется через металлическую (например, медную) матрицу, обладающую хорошей теплопроводностью (рис 1а). Другим вариантом трехстенной конструкции является трехслойная трубка (рис 1б) (ПГ реактора EBR-II).

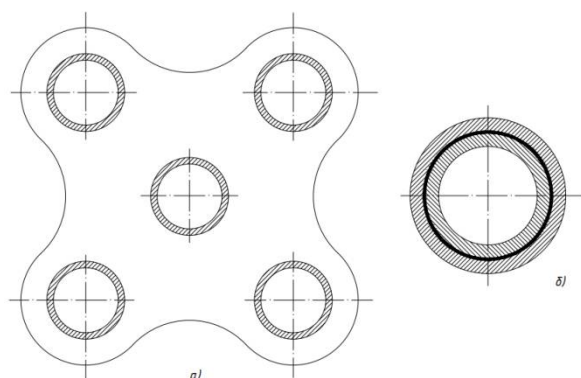


Рис. 1. Типы конструкций теплообменных поверхностей в ПГ натрий - вода: а - теплообменный блок ПГ DFR; б - многослойная теплообменная трубка EBR-II

Примером двухстенной конструкции может служить двухслойная трубка с плотно пригнанными друг к другу слоями, которые, как правило, выполняется из однородного материала. Промежуточное положение по отношению к приведенным выше конструкциям занимают двухстенные теплопередающие поверхности с зазором между слоями. Этот зазор заполняется инертной по отношению к натрию и воде (с высокой теплопроводностью) жидкостью или газом. Преимуществом многостенных конструкций является возможность исключения контакта натрия с водой, что снимает с рассмотрения вопросы, связанные с обеспечением безопасности парогенератора при химическом взаимодействии теплоносителей. В то же время их использование приводит к усложнению и удорожанию теплообменных поверхностей [1]. Аналогичное решение было опробовано в ПГ реактора БР-5 [2]. В нём использованы двойные коаксиальные теплопередающие трубки, кольцевая щель между стенками заполнялась ртутью. Недостатками данной конструкции являются: токсичность ртути и необходимость очистки натрия от неё в случае нарушения герметичности трубного пучка.

Основной целью данной работы является исследование эффективности теплообмена модели двухстенной теплопередающей поверхности с зазором между слоями, позволяющая заменить одностенную конструкцию ПГ и исключить промежуточный натриевый контур из тепловой схемы АЭС с реактором на быстрых нейтронах. В качестве промежуточной среды, заполняющей зазор, предлагается сплав Вуда, который не взаимодействует ни с натрием, ни с водой. Задачей работы являлось исследование зависимости теплофизических параметров модели от её геометрических параметров и режимов течения.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ И ПРОЕКТА

Начальным этапом моделирования было построение твердотельной модели двухстенной теплопередающей поверхности в SolidWorks (рис. 2). Данный программный комплекс предназначен для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения.

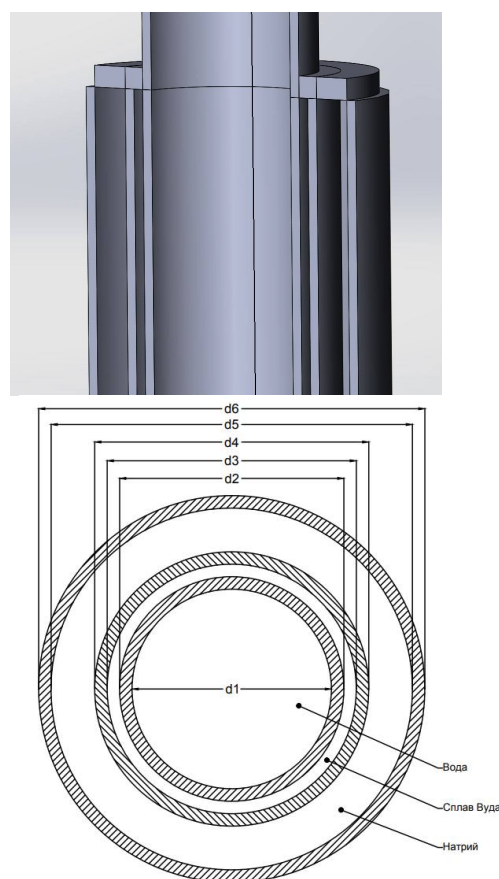


Рис. 2. Твердотельная модель двухстенной теплопередающей поверхности (разрез и вид сверху)

Модель представляет собой теплообменник типа труба в трубе. Толщина стенок и промежуточного

слоя составляет 1 мм. Диаметры трубок для расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Диаметр, мм	Размеры трубок				
	Модель				
	1	2	3	4	5
d_1	16	17	18	19	20
d_2	18	19	20	21	22
d_3	19	20	21	22	23
d_4	21	22	23	24	25
d_5	29	29,8	30,5	31,3	32,1
d_6	30	30,8	31,5	32,3	33,1

Для анализа теплообмена в модели был разработан проект в приложении Flow Simulation, являющимся дополнительным модулем SolidWorks. Данная программа позволяет решать сложные задачи, в которых сочетается несколько видов теплообмена, с достаточной степенью точности. В ходе моделирования учитывалась теплопроводность в твердых телах, а также гравитационные эффекты. Тепловые потери через наружные стенки модели не учитывались, стенки приняты адиабатическими.

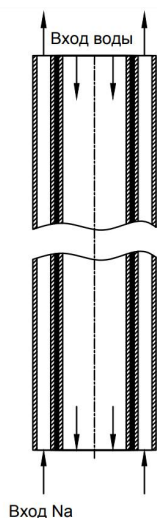


Рис. 3. Направления течения сред в модели

Следующим этапом работы был выбор расчетной сетки. В целях оптимизации соотношения точности расчета и затраченного машинного времени сперва проводился расчет на укрупненной сетке, затем сетка уменьшалась. Значения контрольных параметров (коэффициент теплоотдачи через внутреннюю стенку, температуры воды и натрия на выходе) сравнивались для крупной и мелкой сеток. В случае совпадения точность считалась достигнутой, в противном случае сетка еще уменьшалась. В итоге расчет производился на автоматической сетке пятого уровня.

Таблица 2.

Граничные условия	
Параметр	Значение
Вода	
Вход – отверстие с расходом расход, кг/с температура, °C	Табл. 3 240
Выход – отверстие с давлением давление, МПа	14
Подобласть течения 1 - натрий	
Вход – отверстие с расходом расход, м³/с температура, °C	0,463 355
Выход – отверстие с давлением давление, Па	110000
Подобласть течения 2 - сплав Вуда	
температура, °C	311
давление, Па	110000

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета чисел Рейнольдса по известным расходам были найдены скорости течения воды во внутренней трубке диаметром d_1 (табл.3).

Таблица 3.

Расход, кг/с	Скорость воды на входе, м/с				
	Диаметр, м				
	0,016	0,017	0,018	0,019	0,02
0,133	0,803	0,711	0,634	0,569	0,514
0,169	1,020	0,904	0,806	0,723	0,653
0,249	1,503	1,331	1,187	1,066	0,962
0,331	1,998	1,770	1,578	1,417	1,279
0,414	2,499	2,213	1,974	1,772	1,599
0,497	3,000	2,657	2,370	2,127	1,920
0,662	3,995	3,539	3,157	2,833	2,557
0,993	5,993	5,309	4,735	4,250	3,836
1,324	7,991	7,078	6,314	5,667	5,114
1,655	9,988	8,848	7,892	7,083	6,393
1,986	11,986	10,617	9,471	8,500	7,671

По скоростям и диаметрам определены числа Рейнольдса. В результате проведенных расчетов были получены коэффициенты теплоотдачи на границах вода-стенка и стенка-натрий (табл. 4, 5). С помощью которых получены зависимости и построены графики зависимости числа Нусельта на границах вода - стенка и стенка - натрий от числа Рейнольдса (рис. 4, 5).

Аппроксимация графика зависимости $Nu(Re)$ для границы вода – стенка позволили получить закономерность, которая согласуется с теоретической.

$$Nu = 0.009Re^{0,8}$$

Это позволяет говорить о правильности расчётов и для границы стенка – натрий.

Таблица 4.

Коэффициенты теплоотдачи на границе вода – стенка, Вт/м² · К

Расход, кг/с	Диаметры, мм				
	16	17	18	19	20
0,133	6520	5360	4581	4230	4008
0,169	7692	6736	5946	5460	4945
0,249	10890	9492	8447	7765	7246
0,331	13296	12114	10810	10148	9245
0,414	16759	14654	13089	11876	11177
0,497	19328	17122	15306	13879	13059
0,662	24033	21864	19564	18496	16677
0,993	34022	30910	27670	25697	23573
1,324	43606	39689	35469	33124	30129
1,655	52848	48006	42936	40036	36523
1,986	52849	55989	50205	45572	36446

Таблица 5.

Коэффициенты теплоотдачи на границе стенка – натрий, Вт/м² · К

Расход кг/с	Эквивалентные диаметры, м				
	0,007	0,0068	0,0066	0,0063	0,0061
0,133	8578	6189	1184	6504	6648
0,169	2786	7871	1523	8540	8444
0,249	16338	11496	2259	12336	12771
0,331	14599	15176	2970	15891	16771
0,414	30875	18912	3701	20290	20767
0,497	30825	22547	4446	24409	24691
0,662	28250	30646	5938	31433	32586
0,993	40118	44764	8903	46909	48392
1,324	3215	58589	11805	61333	64289
1,655	3132	75416	14760	77009	79631
1,986	3132	88792	17764	95185	96051

В результате проведённых исследований была проверена применимость сплава Вуда в качестве промежуточного слоя для трубок ПГ натрий – вода. С помощью программного комплекса SolidWorks получены данные для построения зависимости Nu(Re) для границ вода – стенка и стенка – натрий. Первая зависимость, согласующаяся с теоретической, позволяет верифицировать зависимость для границы стенка – натрий, из которой можно сделать выводы о хороших теплопередающих свойствах сплава Вуда и оптимальных геометрических параметров трубки.

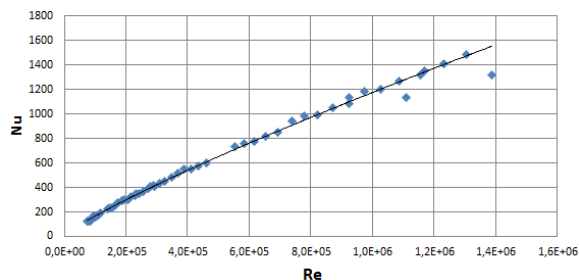


Рис. 4. График зависимости Nu(Re) для границы вода – стенка

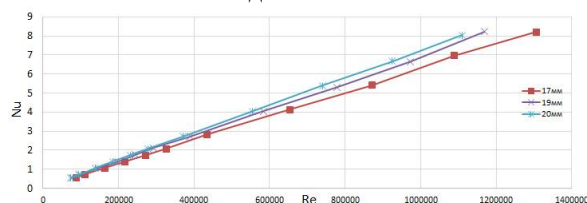


Рис. 5. График зависимости Nu(Re) для границы стенка – натрий

Данная работа имеет перспективы развития в плане использования уже готовой модели для изучения других материалов в качестве промежуточного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И. А. Кузнецов, В. М. Поплавский, Под ред. В. И. Рачкова. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: ИздАТ, 2012, 631с.
2. Лейпунский А. И., Орлов В. В., Пинхасик М. С., Аристархов Н. Н., Ефимов И. А., Тymoш Б. С. Опыт эксплуатации реактора БР-5 за период 1959—1966 гг. // Атомная энергия. 1967. Том 23, №. 6. С 503-511.
3. Казанджан Б.И., Матвеев В.М., Савич Т.Б., Умаров А.М. Экспериментальное исследование электропроводности, плотности и вязкости сплава Вуда // Теплофизика высоких температур. 1989. Том 27, №. 2. С 269-273
4. Zhaowen Huang, Zigeng Luo, Xuenong Gao, Xiaoming Fang, Yutang Fang, Zhengguo Zhang. Preparation and thermal property analysis of Wood's alloy/expanded graphite composite as highly conductive form-stable phase change material for electronic thermal management // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 122, P. 322-329/
5. Теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей. URL: <http://www.gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-01/Na.php> (дата обращения: 20.05.2018)
6. Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Тучков А.М., Щеклеин С.Е. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1;– Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 548 с.